

М. Ч. Ахмедов  
Таджикский технический университет,  
г. Душанбе, Таджикистан

В. А. Лебедев  
УрФУ имени первого Президента России Б.Н. Ельцина,  
г. Екатеринбург, Россия  
mlm@mail.ustu.ru

## ЭЛЕКТРОЛИТИЧЕСКОЕ ПРИГОТОВЛЕНИЕ ЛИГАТУР АЛЮМИНИЯ И МАГНИЯ С НЕОДИМОМ

Выявлены предельные токи ( $0,15 \text{ A/cm}^2$ ) и потенциалы разряда ионов неодима из расплава  $\text{KCl-NaCl}+6,95 \text{ мас.}\% \text{ NdCl}_3$  при  $738^\circ\text{C}$  на жидких алюминиевом  $-(2,2-2,4) \text{ В}$  и магниевом  $-(2,6-2,8) \text{ В}$  катодах. Электролизом этого расплава при плотности тока  $0,1 \text{ A/cm}^2$  получены компактные легкоплавкие лигатуры, содержащие до  $30 \text{ мас.}\%$  неодима с выходом по току  $80 \%$  для катода из магния и  $96 \%$  – из алюминия. Более высокий выход по току и меньший расход электроэнергии ( $2,14$  и  $1,53$ )  $\text{кВт}\cdot\text{ч/кг Nd}$  обусловлены большей на  $0,40 \text{ В}$  деполяризацией при осаждении неодима на жидком алюминиевом катоде. Удельный расход электроэнергии при электролитическом получении индивидуальных редкоземельных металлов почти на порядок выше, подтверждая перспективность разрабатываемой технологии.

*Ключевые слова:* лигатуры Nd-Al, Nd-Mg, электролиз расплавов, жидкие катоды, выход по току, удельный расход электроэнергии

Limiting currents ( $0.15 \text{ A/cm}^2$ ) and discharge potentials of the neodymium ions from the melt  $\text{KCl-NaCl} + 6.95 \text{ wt.}\% \text{ NdCl}_3$  at  $738^\circ\text{C}$  in a liquid cathode were identified: for the aluminum cathode -  $(2.2-2.4) \text{ V}$ , for the magnesium cathode -  $(2.6-2.8) \text{ V}$ . With this melt electrolysis at a current density of  $0.1 \text{ A/cm}^2$  compact fusible ligatures were obtained, containing up to  $30 \text{ wt.}\%$  of neodymium with a current yield of  $80\%$  for the magnesium cathode and  $96\%$  for the aluminum cathode. Higher current output and lower power consumption ( $2.14$  and  $1.53$ )  $\text{kW}\cdot\text{h/kg Nd}$  associated with greater (by  $0.4 \text{ V}$ ) depolarization during the deposition of neodymium on the liquid aluminum cathode. Specific energy consumption at the individual electrolytic production of rare earth metals is almost an order of magnitude higher, that confirms the promise of the technology being developed.

*Keywords:* ligatures Nd-Al, Nd-Mg, electrolysis of melts, liquid cathodes, current output, the specific energy consumption

Основными промышленными авиационными сплавами являются сплавы системы алюминий-магний, к которым в качестве легирующих до

бавок добавляют редкоземельные металлы, увеличивающие удельную прочность сплавов при повышенных температурах. Наиболее эффективными добавками являются неодим и иттрий [1]. В современной практике эти добавки вводятся в виде дорогих и коррозионно-активных металлических иттрия или неодима. Более эффективным является использование для этой цели лигатур, полученных электролизом расплавленных солей, содержащих  $\text{NdCl}_3$ . В настоящей работе изучена поляризация и определены параметры электролитического приготовления лигатур  $\text{Nd-Al}$ ,  $\text{Nd-Mg}$  в расплаве  $\text{KCl-NaCl-NdCl}_3$ .

Типичные поляризационные кривые жидких алюминиевого и магниевого электродов при температуре  $738^\circ\text{C}$  в расплаве  $\text{KCl-NaCl}+7\text{ вес.}\% \text{NdCl}_3$  показаны на рис. 1.

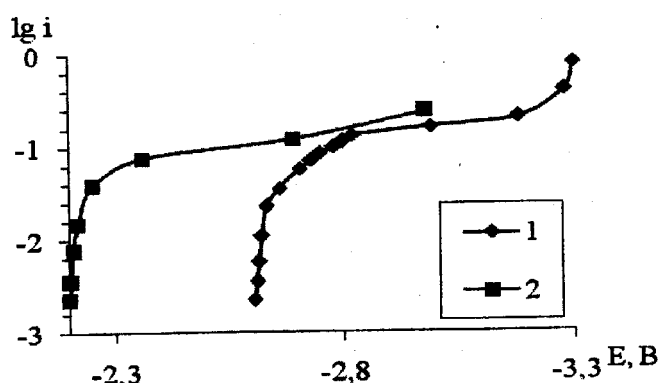


Рис. 1. Поляризационные кривые магниевого (1) и алюминиевого (2) жидких катодов

Выше  $2 \cdot 10^{-3} \text{ А/см}^2$  потенциалы катодов начинают смещаться в сторону электроотрицательных значений, что отвечает разряду на катоде ионов  $\text{Nd}$  с образованием сплавов  $\text{Nd-Al}$  и  $\text{Nd-Mg}$ . Повышение катодной плотности тока выявляет предельный ток процесса. Потенциалы катодов быстро смешаются в отрицательную область, до значений, при которых становится возможным разряд ионов щелочных металлов. При плотностях тока выше  $1\text{--}2 \text{ А/см}^2$  для магниевого катода потенциалы меняются незначительно, что свидетельствует о появлении на поверхности электрода самостоятельной фазы щелочного металла.

Предельные плотности тока  $0,15\text{--}0,2 \text{ А/см}^2$  практически одинаковы для магниевого и алюминиевого электродов и близки к наблюдавшимся ранее при осаждении иттрия и церия на жидком цинковом и висмутовом катоде, соответственно, из расплава  $\text{KCl-NaCl}+4\text{ вес.}\% \text{CeCl}_3$  ( $\text{YCl}_3$ ) при  $700^\circ\text{C}$  [2].

Осаждение неодима на жидкие магниевый и алюминиевый катоды проводили из расплава  $\text{KCl-NaCl}$ , содержащего  $6,95\text{ вес.}\% \text{NdCl}_3$ . Исходя из поляризационных кривых (рис. 1), катодную плотность тока выбрали  $0,10 \text{ А/см}^2$  для обоих электродов.

Электролиз проводили с нерастворимым анодом из графита при температуре 738 °С. Количество пропущенного электричества соответствовало получению сплавов, содержащих 30 вес.% неодима.

На рис. 2 и рис. 3 показаны  $E$ – $\tau$  кривые магниевового и алюминиевого катодов.

Из рис. 2, 3 видно, что потенциал сплава монотонно смещается в сторону электроотрицательных значений, достигая под током -3,01 В для магниевского катода и -2,64 В для алюминиевого. Это связано со сплавообразованием.

Кривые 2 на рис. 2, 3 построены по измерениям, выполненным при кратковременном отключении тока электролиза с целью контроля процесса.

В результате электролиза получены сплавы с блестящей поверхностью, медленно окисляющиеся на воздухе с выходом по току 77,23 % для катода из магния и 95,87 % для катода из алюминия.

Удельный расход электроэнергии для процесса, рассчитанный по уравнению

$$W = \frac{U_{\text{ср}}}{q \cdot \eta},$$

где  $U_{\text{ср}}$  – среднее напряжение, В;  $\eta$  – выход по току;  $q$  – электрохимический эквивалент неодима (1,795 г/А·ч), составил 2,14 и 1,53 кВт·ч/кг для магниевского и алюминиевого катодов, соответственно. Эти величины значительно ниже приводимых в литературе значений расхода электроэнергии при получении мишметалла (выход по току – 50 %, напряжение на ванне – 12 В, удельный расход электроэнергии – 13,87 кВт·ч/кг) и церия (выход по току – 70 %, напряжение на ванне – 12 В, удельный расход электроэнергии – 9,85 кВт·ч/кг) [3].

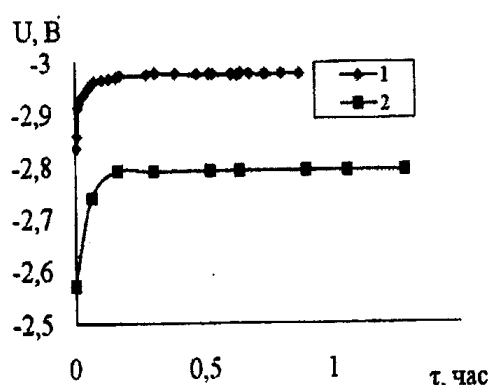


Рис. 2.  $U$ – $\tau$  кривая магниевского катода при электролизе расплава  $\text{KCl-NaCl}+6,95$  вес.%  $\text{NdCl}_3$  при 738 °С,  $i = 0,10$  А/см<sup>2</sup>:  
1 – под током, 2 – без тока

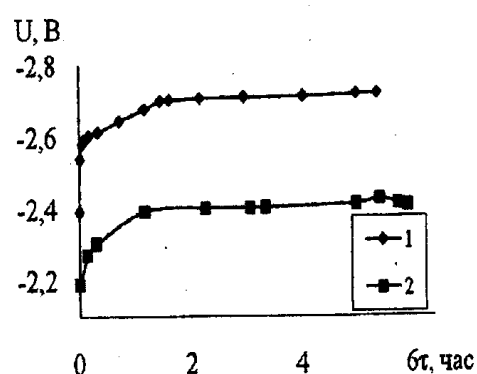


Рис. 3.  $U$ – $\tau$  кривая алюминиевого катода при электролизе расплава  $\text{KCl-NaCl}+6,95$  вес.%  $\text{NdCl}_3$  при 738 °С,  $i = 0,10$  А/см<sup>2</sup>:  
1 – под током, 2 – без тока

Более высокий выход по току и меньший расход электроэнергии в случае алюминиевых сплавов обусловлены большей деполяризацией при осаждении неодима на алюминий и связано с более энергичным взаимодействием неодима с алюминием.

Электролитический способ получения сплавов неодима с магнием и алюминием имеет существенное преимущество перед используемыми методами сплавления компонентов в металлическом состоянии, поскольку существенно снижаются затраты связанные с получением металлических р.з.м. Процесс электролитического получения лигатур может протекать непрерывно при условии периодического извлечения из ванны получаемого сплава и введения в электролит расходуемого хлорида неодима.

### Список литературы

1. *Рохлин Л. Л.* Магниево-редкоземельные сплавы, содержащие редкоземельные металлы / Л. Л. Рохлин М.: Наука, 1980. 192 с.
2. *Ничков И. Ф.* Кинетика выделения редких тугоплавких металлов на жидких катодах / И. Ф. Ничков // Физическая химия и электрохимия расплавленных солей и шлаков. Киев: Наукова Думка, 1969. Т. 3. С. 76–103.
3. *Каплан Г. Е.* Электролиз в металлургии редких металлов / Г. Е. Каплан, Г. Ф. Силина, Ю. Н. Остроушко М.: Металлургиздат, 1963. 360 с.